



Revue Géographique de l'Est

vol. 45 / 2 | 2005

Climat, sécheresse et canicule

Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg

Radiative phenomena and the urban heat island in the Strasbourg agglomeration

Strahlungsprozesse und Wärmeinsel in der Umgebung von Strassburg

Laurent Fischer



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/rge/473>

ISSN : 2108-6478

Éditeur

Association des géographes de l'Est

Édition imprimée

Date de publication : 1 avril 2005

Pagination : 99-112

ISSN : 0035-3213

Référence électronique

Laurent Fischer, « Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg », *Revue Géographique de l'Est* [En ligne], vol. 45 / 2 | 2005, mis en ligne le 10 juin 2009, consulté le 03 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/rge/473>

Ce document a été généré automatiquement le 3 mai 2019.

Tous droits réservés

Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg

Radiative phenomena and the urban heat island in the Strasbourg agglomeration
Strahlungsprozesse und Wärmeinsel in der Umgebung von Strassburg

Laurent Fischer

NOTE DE L'ÉDITEUR

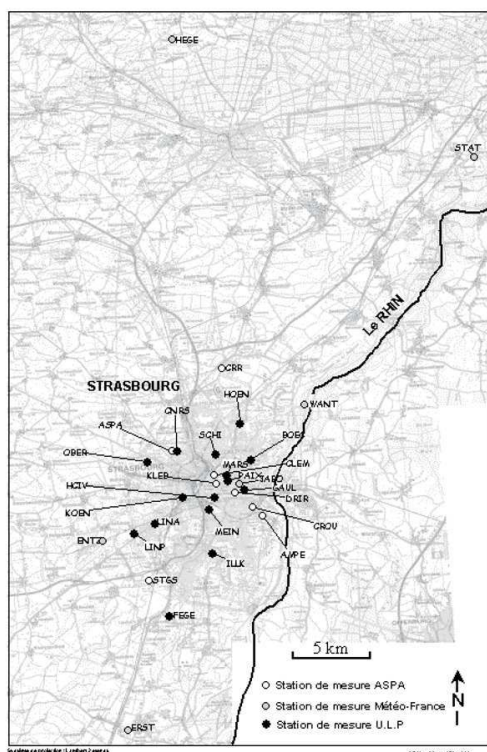
Article reçu le 15 janvier 2005, accepté le 28 février 2005

Introduction

- 1 Cette étude s'est déroulée dans le cadre du programme de recherche PRIMEQUAL (Programme de Recherche Interorganismes pour une Meilleure Qualité de l'Air à l'échelle Locale) qui s'est attaché, de 1996 à 2000, à développer un système opérationnel de prévision statistique des pointes de pollution photochimique, sur l'agglomération de Strasbourg/Kehl. La Faculté de Géographie et d'Aménagement de Strasbourg et l'ASPA (Association pour l'étude et la Surveillance de la Pollution Atmosphérique en Alsace) avaient en charge l'amélioration de la fiabilité du modèle statistique de prévision, développé par Météo-France, par analyse de données fines des paramètres et processus climatiques à l'échelle urbaine. Une première étape consistait à densifier le réseau de mesure des paramètres climatiques et énergétiques de surface existant, de façon à disposer d'une base de données permettant une bonne caractérisation du climat urbain de l'agglomération de Strasbourg. Les stations climatiques fixes ont été complétées par une campagne de mesure intensive qui s'est déroulée au mois d'août 1999. Notre réseau de mesure se compose de 26 stations (figure 1). L'objectif de la campagne de mesure était notamment d'appréhender de façon précise, essentiellement à l'échelle spatiale, les

phénomènes d'îlot de chaleur urbain, paramètre qui a une influence notable sur la dynamique de la pollution, notamment par la génération de brises thermiques. Nous avons caractérisé l'îlot de chaleur urbain et étudié sa dynamique à l'aide d'une cartographie horaire de l'évolution des champs de température. Des transects de mesure de la température et de l'humidité relative ont été effectués sur 3 parcours couvrant les zones périurbaines et urbaines de l'agglomération strasbourgeoise, à différents moments de la journée, afin d'améliorer notre connaissance de la dynamique spatiale de ces paramètres. L'ensemble de ces études devait permettre de déterminer les paramètres climatiques urbains pertinents, qui peuvent apporter des informations utiles au prévisionniste de la qualité de l'air pour améliorer son diagnostic.

Figure 1 : Localisation des sites de mesure.

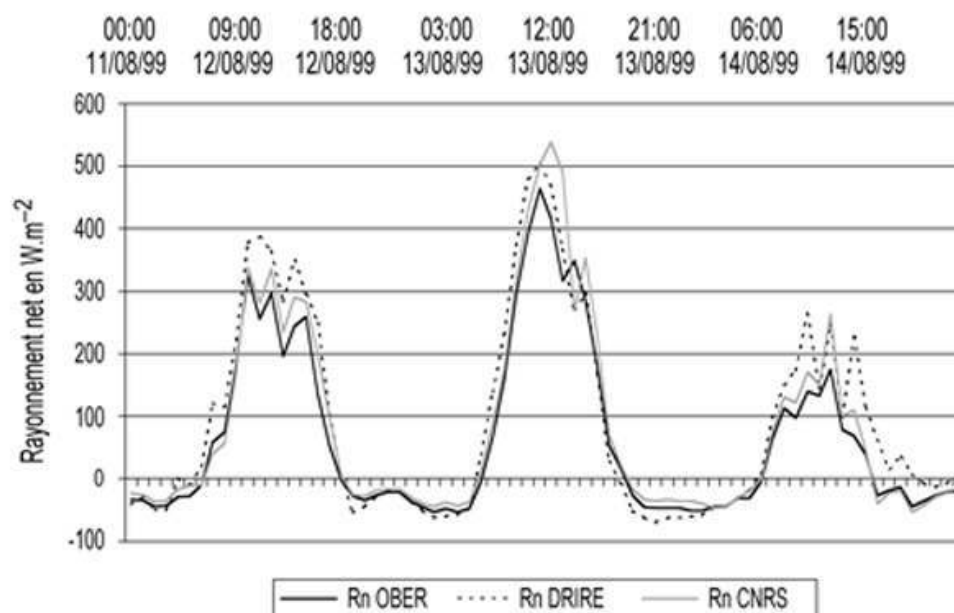


I. Mesures radiatives

- 2 Le rayonnement solaire, en tant que support d'énergie, agit sur la circulation des basses couches atmosphériques. Le rayonnement agit en effet sur les champs de température, auxquels s'associent des champs de vent locaux, tels que les brises thermiques cycliques journalières, principalement dans le cadre de situations anticycloniques bien prononcées.
- 3 Pour Aida et Gotoh, en 1982, l'albedo urbain baisse quand la « rugosité » augmente. L'albedo dépend aussi de l'angle du rayonnement incident et de la morphologie des canyons urbains. Les études de Schmid *et al.* (1991), montrent que les flux d'énergie d'une banlieue résidentielle à Vancouver varient de 25 à 40 % sur un espace horizontal de 100 à 1 000 m. De telles différences étaient jusqu'alors observées entre des zones urbaines et rurales ! Il est possible que des phénomènes advectifs locaux dus à des variabilités de

surface à petite échelle affectent le bilan d'énergie à plus large échelle. Le rayonnement net varie relativement peu spatialement. La figure 2 montre l'évolution du rayonnement net sur 3 sites de l'agglomération strasbourgeoise. On voit clairement que le rayonnement net varie peu entre le centre urbain et les zones périurbaines pour une période présentant une variabilité importante de la couverture nuageuse.

Figure 2 : Variation du rayonnement net sur 3 sites de l'agglomération de Strasbourg.



A. Le réseau fixe de mesures radiatives installé à l'ASPA depuis 1996

- 4 Nous disposons donc d'une série chronologique de mesures radiatives importante et fiable qui permet de déterminer le climat radiatif de Strasbourg de manière assez satisfaisante. Pour cela, nous avons dans un premier temps relevé les maxima quart-horaires journaliers, des différentes composantes radiatives mesurées durant la période d'étude. Le maximum quart-horaire semble représenter un bon indicateur du climat radiatif de la zone d'étude sur une longue période.

B. Les conditions radiatives de la campagne de mesures intensives

- 5 Les derniers jours du mois de juillet et les 2 premières journées d'août 1999 ont été très ensoleillés. À partir du 3 août, des conditions météorologiques nettement plus contrastées se sont mises en place, avec alternance de journées très maussades et de journées bien ensoleillées. Durant la campagne de mesure du 11 au 14 août 1999, la journée la plus ensoleillée est celle du 13 août avec une durée d'insolation de 10 heures.

C. Les phénomènes radiatifs urbains dans la compréhension de l'îlot de chaleur urbain

- 6 Les processus radiatifs, qui sont le résultat des conditions énergétiques de surface, liées à la structure du bâti, influencent directement la dynamique du champ de température en zone urbaine (Oke, 1978). Ces processus ont fait l'objet de nombreux travaux depuis 1960 dans les grandes métropoles occidentales, notamment dans les grandes conurbations d'Amérique du nord où d'importantes investigations ont été menées par Oke pour mieux appréhender ces phénomènes. Notre étude porte sur l'ensemble de l'agglomération de Strasbourg, qui représente une population proche de 430 000 habitants et une superficie de 304 km². La période de mesure pendant laquelle le réseau complet de mesures radiatives était disponible étant courte, la journée retenue pour l'analyse, est celle du 13 août, journée de beau temps, ne présentant que quelques passages nuageux dans l'après-midi.

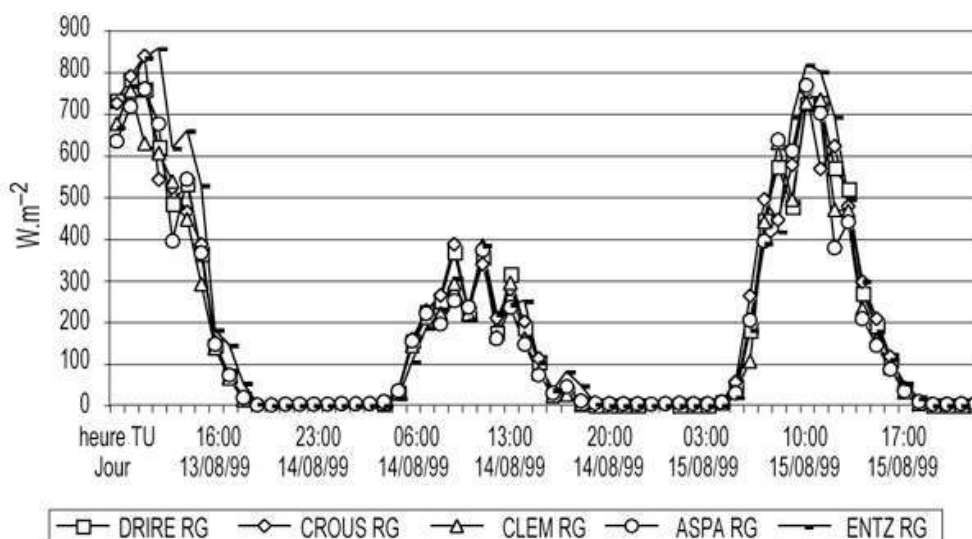
1. Configuration des sites de mesures radiatives

- 7 Les sites de mesure installés sur les toits bien dégagés ne sont pas sous l'influence de réflexions parasites dues à des bâtiments proches. Les sites installés dans les rues sont classés en fonction du rapport entre la largeur de la rue et la hauteur des bâtiments voisins. Les caractéristiques géométriques des 3 sites de mesure installés dans les rues sont indiquées dans le tableau 1.
- 8 Nous voyons que les sites Avenue de la Paix (orientation NNE-SSO) et Avenue de la Marseillaise (orientation ONO-ESE) ont des indices géométriques identiques, alors que le site Avenue du Général de Gaulle (orientation N-S) se distingue par une avenue très large et des bâtiments de hauteur importante. L'avenue de la Marseillaise a une orientation approximativement perpendiculaire aux deux autres avenues. Nous avons donc un échantillon de la géométrie des avenues que l'on rencontre à Strasbourg.

2. Résultats des mesures radiatives

- 9 Dans un premier temps, le rayonnement global incident a été comparé pour 5 sites de mesure de l'agglomération strasbourgeoise (figure 3). Les mesures obtenues aux sites DRIRE, CROUS et CLEMENCEAU ont été effectuées sur des toits en centre urbain. Les mesures des sites ASPA et ENTZ ont été effectuées respectivement sur un toit en zone périurbaine et sur un mât en zone rurale. On constate qu'il n'y a pas de gros écarts entre les valeurs de rayonnement obtenues sur les 5 sites. Par beau temps ensoleillé, c'est toutefois le site d'Entzheim qui présente les valeurs maximales les plus élevées, avec plus de 800 W.m⁻² à 12 h TU, mais les écarts avec les autres sites ne dépassent pas 70 W.m⁻² à 12 h TU, ce qui représente environ 8 %. Cette valeur, inférieure à 10 %, est similaire à celles constatées par d'autres chercheurs (Oke, 1978). On peut donc raisonnablement penser, dans un premier temps, que les écarts entre les mesures urbaines et rurales peuvent être considérés comme négligeables.

Figure 3 : Comparaison du rayonnement global incident sur 5 sites de l'agglomération de Strasbourg.



- 10 Pour comparer les différentes configurations de mesure, nous avons étudié les valeurs d'un même paramètre mesuré à des hauteurs différentes. Nous traiterons dans un premier temps le rayonnement en courtes longueurs d'ondes, plus précisément les rayonnements global, incident et réfléchi, ainsi que l'albedo de surface, qui est le rapport entre le rayonnement global réfléchi et le rayonnement global incident. Dans un second temps, nous porterons notre attention sur le rayonnement incident et émis en grandes longueurs d'ondes, avant d'analyser le rayonnement net. Ces mesures nous permettront d'analyser de façon plus précise, les phénomènes radiatifs et leur influence sur les phénomènes thermiques, qui conduisent au développement de l'îlot de chaleur urbain.

Le rayonnement de courtes longueurs d'ondes

- 11 Par ciel clair, le rayonnement solaire global incident est, comme on peut le penser, plus important sur les toits que sur les mâts à 10 m. Le 13 août, il est de l'ordre de 350 W.m⁻² à 7 h TU sur les toits. À la même heure, l'avenue de la Marseillaise, présente la valeur la plus élevée à 10 m, avec 185 W.m⁻². Elle est suivie par l'avenue de la Paix, puis par l'avenue du Général de Gaulle, où la hauteur des bâtiments est la plus élevée et où l'orientation est nord-sud. Au niveau du mât de l'avenue de la Paix, on mesure à 7 h TU, 130 W.m⁻² et 100 W.m⁻² sur le mât de l'avenue du Général de Gaulle. Ces deux avenues sont d'orientation presque identique, mais de géométrie différente. Le rayonnement direct atteint donc plus facilement le capteur situé avenue de la Paix que celui situé avenue du Général de Gaulle qui est masqué par les bâtiments plus hauts et orientés parfaitement nord/sud. Le rayonnement direct n'est plus masqué par les bâtiments vers 9 h TU. Sur les échafaudages, les valeurs maximales observées à 12 h TU sont équivalentes à celles mesurées à 10 m. On observe en début de matinée et en fin d'après-midi, l'effet de masque dû aux bâtiments, qui se matérialise par un retard d'éclairement des capteurs sur les échafaudages par rapport aux mâts de 10 m.
- 12 Le rayonnement global réfléchi atteint 100 W.m⁻² vers 12 h TU, sur les toits, qui sont recouverts de gravier. À la même heure, les mâts de l'avenue de la Paix et du Général de Gaulle présentent des valeurs de l'ordre de 130 W.m⁻², qui correspondent au maximum

journalier. Le rayonnement réfléchi avenue de la Marseillaise a un comportement un peu différent. Le maximum journalier sur le mât est atteint vers 9 h avec des valeurs de l'ordre de 100 W.m^{-2} . Après 10 h, les valeurs tombent à 40 W.m^{-2} , puisque les bâtiments du côté sud font obstacle au rayonnement solaire jusqu'à vers 16 h.

- 13 Par temps clair, à 12 h TU, si nous comparons le rayonnement réfléchi entre les toits et les échafaudages qui sont au niveau de la surface, on observe des valeurs de 100 W.m^{-2} sur le toit de la DRIRE (figure 4) et 200 W.m^{-2} à 2 m avenue de Gaulle (figure 5).

Figure 4 : Rayonnement global incident et rayonnement réfléchi le 13 août 1999 sur le toit de la DRIRE.

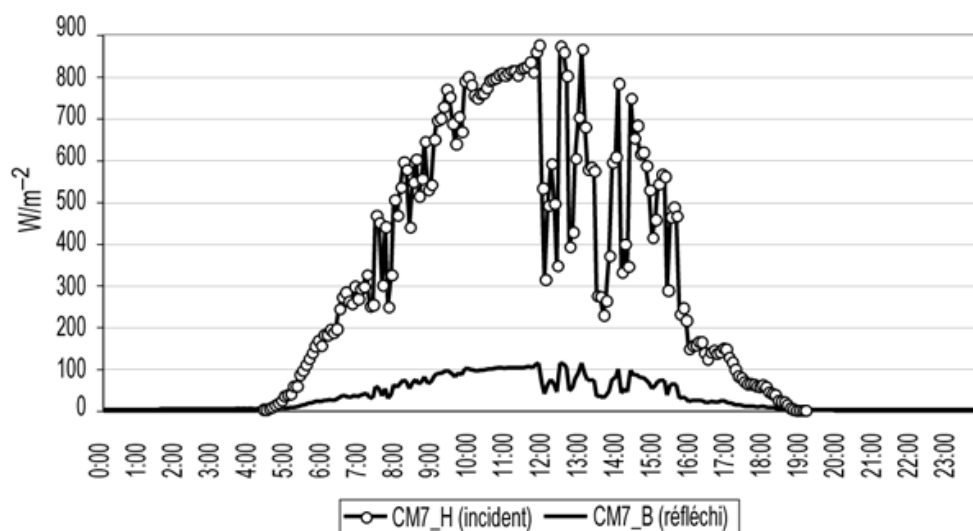
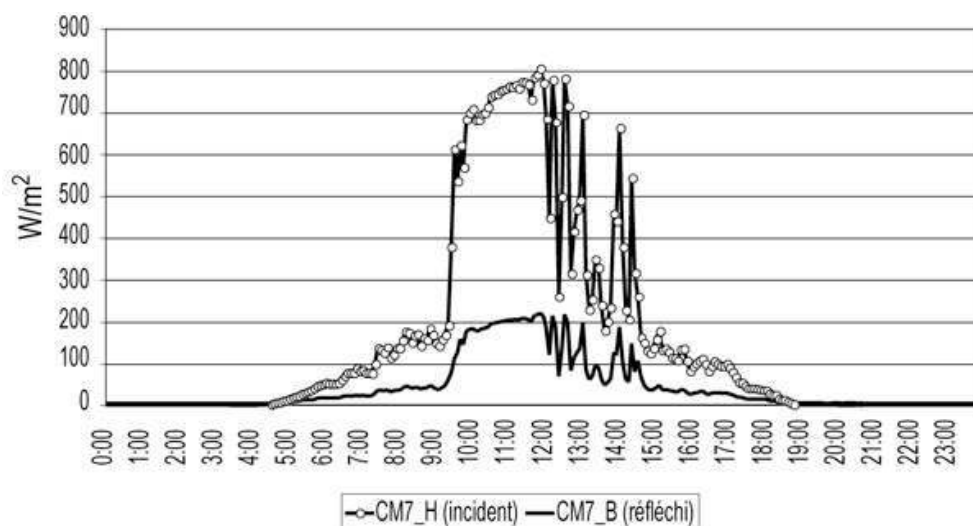


Figure 5 : Rayonnement global incident et rayonnement réfléchi le 13 août 1999 sur le site de l'avenue De Gaulle à 2 m de hauteur.



- 14 Les figures 4 et 5 montrent l'évolution du rayonnement global incident et réfléchi. L'effet de canyon urbain est bien visible, avec les heures de lever et de coucher du soleil qui sont fonction de l'orientation et de la hauteur des bâtiments (figure 5) et surtout l'effet de masque sur le rayonnement direct.

- 15 Les réflexions multiples sur les bâtiments aboutissent à l'atténuation du rayonnement réfléchi et à l'absorption du rayonnement par les bâtiments. À hauteur identique, plus le rapport H/W est faible, plus l'atténuation est forte. Les mesures d'albedo vont confirmer ces résultats.
- 16 L'albedo est identique sur les toits du CROUS et de la DRIRE, recouverts de gravier. Les valeurs moyennes, enregistrées en journée entre 6 h TU et 18 h TU, sont comprises entre 0,12 et 0,14 par ciel clair. Par ciel couvert, on note des valeurs moyennes journalières de l'ordre de 0,09 à 0,11. Les valeurs moyennes sont en effet de l'ordre de 0,12 à 0,15 sur les mâts. Par ciel couvert, les valeurs entre les toits et les mâts sont peu différentes, elles sont de l'ordre de 0,11 à 0,12 sur les mâts. Les courbes ont une allure très lissée par ciel couvert, du fait d'un rayonnement entièrement diffus, qui « adoucit » les courbes. Le mât de l'avenue du Général de Gaulle montre des valeurs d'albedo de l'ordre de 0,17 en moyenne. Par ciel clair ou ciel couvert les valeurs restent identiques, mais on note à nouveau une courbe plus lissée par ciel couvert. Cette avenue étant très large et bordée d'immeubles de grande hauteur, avec des surfaces vitrées importantes, l'albedo mesuré à 10 m y est plus important que sur les toits ou que sur les autres avenues, à hauteur égale. D'autre part il est à noter que le mât de 10 m se trouve dans cette avenue, placé au quart de la hauteur des bâtiments.
- 17 L'albedo mesuré à la surface du sol, montre des valeurs de l'ordre de 0,26 à 0,28 par ciel clair et 0,25 à 0,26 par ciel couvert sur tous les sites. Au niveau de la surface, le pouvoir réflecteur des matériaux qui constituent les sites, engendre des albedos élevés par rapport aux toits. Le rayonnement réfléchi est d'autant plus important que l'on se place à faible hauteur dans les canyons urbains. Ceci confirme les résultats obtenus ailleurs.
- 18 Ces mesures, effectuées sur les 3 avenues, montrent clairement que les valeurs de l'albedo, dans le canyon urbain, diminuent avec la hauteur, d'autant plus vite que la valeur de H/W est plus forte (figures 6 et 7). L'avenue de Gaulle est 3 fois plus large que les deux autres avenues et présente un rapport H/W moins important.
- 19 Sur les figures 6 et 7, on observe clairement l'effet de la réflexion sur les matériaux des façades. Entre 9 h et 15 h le rayonnement solaire atteint directement les capteurs. À 2 m, où les réflexions sont très importantes, l'albedo atteint 0,25.

Figure 6 : Albedo le 13 août 1999 sur le site de l'avenue de Gaulle à 10 m de hauteur.

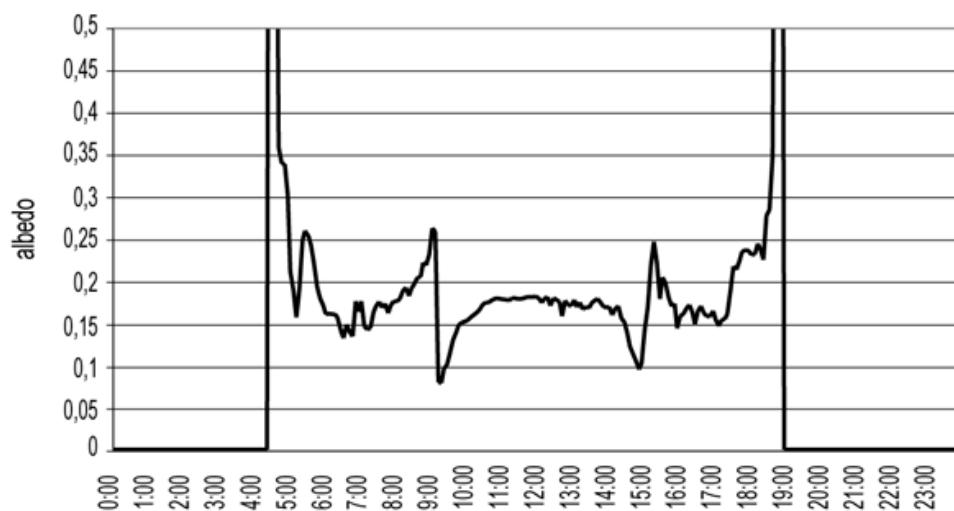
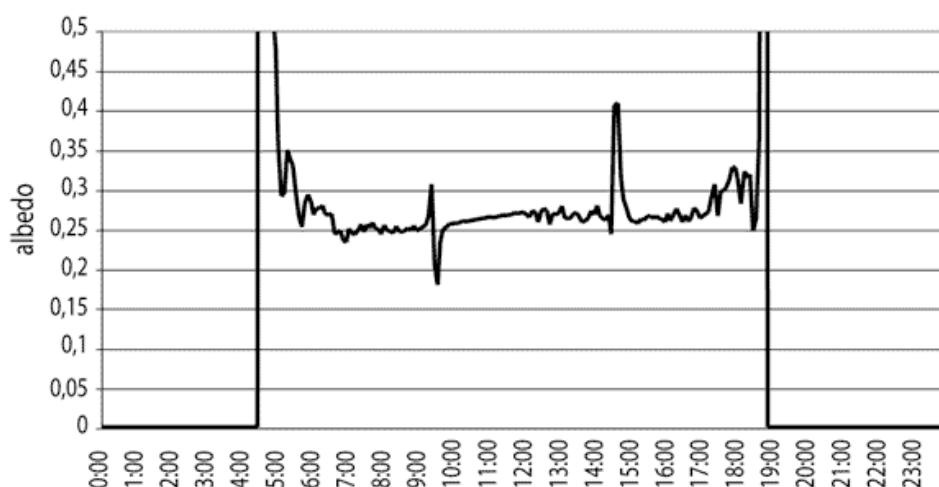


Figure 7 : Albedo le 13 août 1999 sur le site de l'avenue de Gaulle à 2 m de hauteur.



- 20 La nature des toits est très importante, leur couleur, ainsi que leur inclinaison, conditionnent les valeurs d'albedo. Pour des raisons pratiques, nous avons effectué des mesures d'albedo uniquement sur des toits plats, recouverts de gravier assez sombre. Les valeurs d'albedo mesurées sur ces toits sont de l'ordre de 0,12. Il s'agit de surfaces peu réfléchissantes. Au total nous avons observé que l'albedo est plus faible en ville et que le bilan du rayonnement solaire apparaît plus élevé en ville qu'à la campagne.

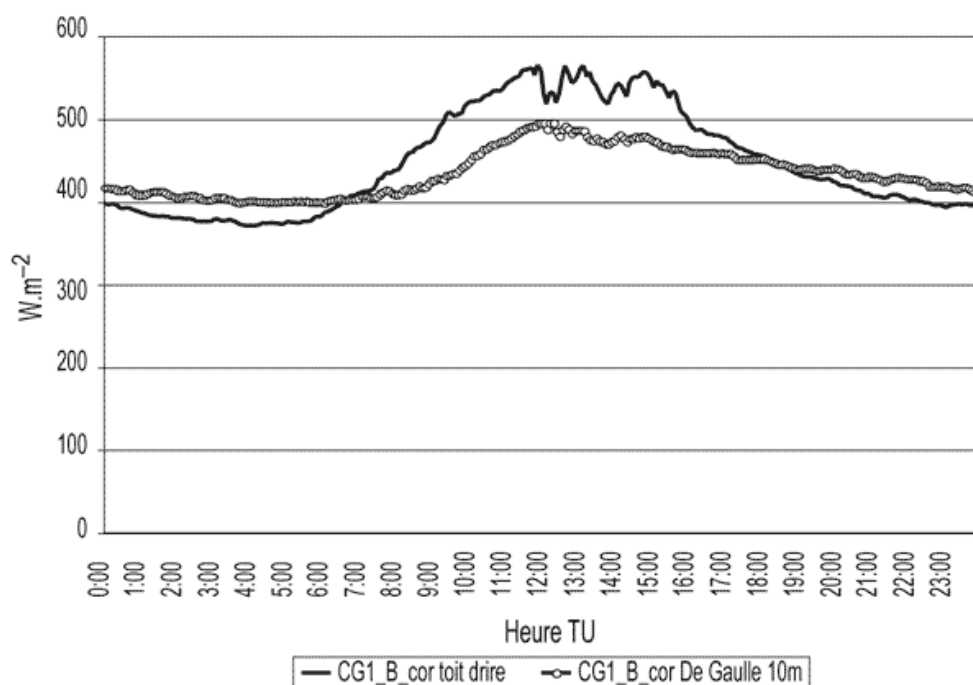
Le rayonnement de grandes longueurs d'ondes

- 21 De nuit, par ciel assez dégagé, en site urbain, à la DRIRE et à 10 m avenue de Gaulle, les valeurs du rayonnement infrarouge descendant sont de l'ordre de 310 à 330 W.m^{-2} . L'écart entre le mât de l'avenue de Gaulle et le toit de la DRIRE est constant, mais faible, de l'ordre de 10 W.m^{-2} . Le mât de l'avenue de Gaulle montre des valeurs de 10 W.m^{-2} supérieures à celles mesurées sur le toit de la DRIRE : le capteur à 10 m reçoit plus de

rayonnement. Ce phénomène est dû aux émissions multiples du rayonnement sur les façades des bâtiments. En site périurbain, à l'ASPA, on note des valeurs comprises entre 360 et 380 W.m^{-2} . En journée par ciel clair les valeurs grimpent à près de 400 W.m^{-2} en site urbain et 460 W.m^{-2} en site périurbain.

- 22 La figure 8 montre l'évolution du rayonnement infrarouge ascendant émis. Les valeurs maximales atteignent 550 W.m^{-2} sur le toit de la DRIRE et 500 W.m^{-2} à 10 m avenue du Général de Gaulle, en journée vers 12 h TU (figure 8). Le rayonnement émis est supérieur sur les toits par rapport à 10 m, entre 7 h et 18 h TU. Pendant la nuit, c'est l'inverse qui se produit. Les toits se refroidissent plus vite que les canyons et le rayonnement infrarouge devient inférieur à celui mesuré dans les canyons. De nuit, le rayonnement émis à 10 m est supérieur au rayonnement émis sur les toits, en raison de la surface émettrice plus importante, constituée par les murs des bâtiments. En journée, il est inférieur car les structures bâties absorbent le rayonnement. Le bilan de l'infrarouge est en faveur de la rue.

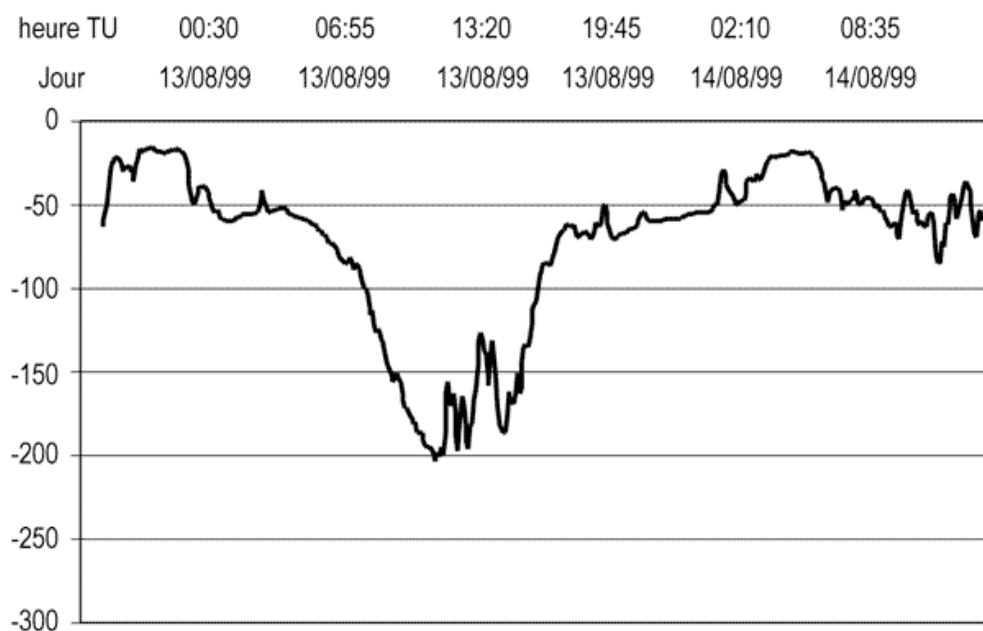
Figure 8 : Rayonnement ascendant en grandes longueurs d'onde émis par la surface le 13 août 1999.



Le bilan du rayonnement infrarouge

- 23 Le bilan de l'infrarouge est défini comme la différence entre le rayonnement descendant en grandes longueurs d'onde et le rayonnement ascendant en grandes longueurs d'onde. Comparons le bilan de l'infrarouge mesuré à différentes hauteurs. Avenue de la Paix, entre les mâts et les échafaudages, nous observons que le BIR, par ciel dégagé, de nuit est équivalent. Les valeurs sont de l'ordre de -50 W.m^{-2} , ce qui est à peu près identique aux valeurs observées sur le toit de la DRIRE (figure 9).

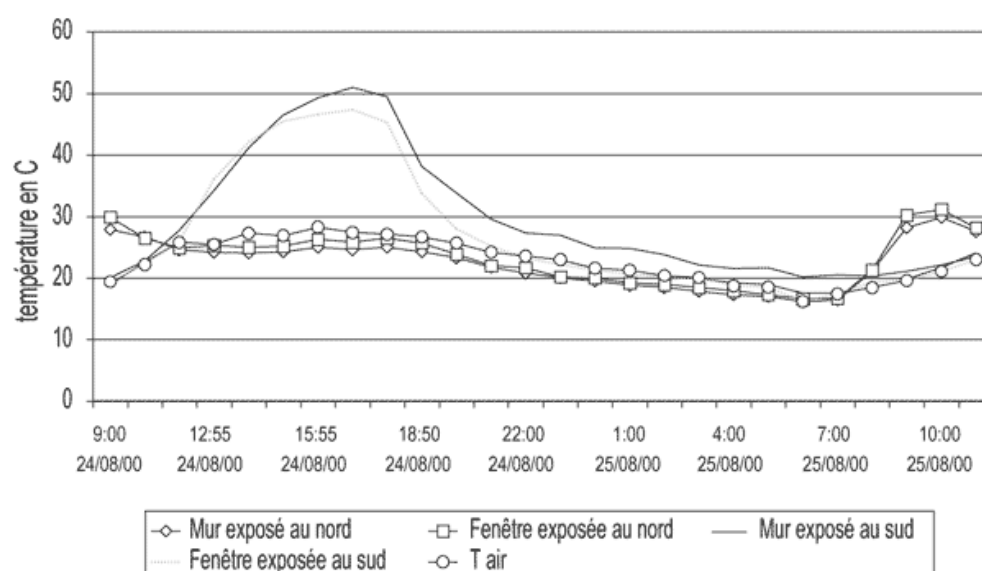
Figure 9 : Bilan du rayonnement infrarouge sur le toit de la DRIRE.



- 24 Le rayonnement émis est donc plus important que le rayonnement descendant. Sur l'avenue de la Marseillaise, le bilan de l'infrarouge la nuit par ciel clair est de -60 W.m^{-2} sur le mât et -40 W.m^{-2} en surface. Sur l'avenue du général de Gaulle, on mesure la nuit, -70 W.m^{-2} sur le mât et -50 W.m^{-2} en surface. Nous pouvons constater que le bilan est toujours négatif avec des valeurs absolues plus faibles au fur et à mesure qu'on se rapproche de la surface. D'autre part, le bilan mesuré à 10 m sur les avenues de la Paix et de la Marseillaise est pratiquement identique à celui observé sur le toit de la DRIRE.
- 25 De jour, par ciel dégagé, Les courbes sont identiques avenue de la Marseillaise et avenue de la Paix. Par ciel couvert, de nuit, sur les toits, le rayonnement ascendant est seulement supérieur de 10 W.m^{-2} au rayonnement descendant. Sur l'avenue de la Marseillaise, sur l'avenue De Gaulle et sur l'avenue de la Paix, la différence entre le B.I.R. à 2 et 10 m s'échelonne de 0 à 20 W.m^{-2} . La géométrie différente des rues intervient : en effet à 10 m, les surfaces d'émission prises en compte par le capteur sont plus importantes qu'à 2 m. Le bilan moyen journalier de l'infrarouge, met en lumière le déficit de rayonnement infrarouge nocturne qui est moindre dans les rues en canyon en zone urbaine que sur les sommets des toits. Le rayonnement en grande longueur d'onde semble fortement influencer les mécanismes qui contrôlent la température de l'air principalement à cause de l'influence de l'évolution temporelle du bilan de l'infrarouge dans les zones urbaines (Nunez et Oke, 1976). Dans les rues, le rayonnement est fortement influencé par les bâtiments et par la nature des matériaux, qui n'ont pas la même réponse radiative au cours de la journée, alors que sur les toits, nous sommes sur des surfaces planes qui offrent peu de variabilité spatiale vis-à-vis du rayonnement.
- 26 Lors des mesures ponctuelles des températures de surface des façades, effectuées ponctuellement entre le 24 et 25 août 2000 à l'aide d'un thermomètre infrarouge, nous avons mis en évidence le rayonnement en grandes longueurs d'ondes émis par les surfaces urbaines qui se manifeste par un re-largage nocturne de chaleur, sur lequel nous reviendrons dans l'évocation de l'îlot de chaleur urbain. La figure 10 montre des mesures de température de surface pour un bâtiment de Strasbourg qui présente le même cas de

figure que l'avenue de la Paix. Nous avons mesuré les températures sur une façade exposée au sud et sur une façade exposée au nord. Les mesures ont été réalisées sur des surfaces vitrées et sur des murs en grès. En référence, nous avons fait figurer la température de l'air sous abri au même endroit. Il apparaît de façon assez nette, que les murs et les fenêtres exposés au nord présentent une température voisine de celle de l'air, même si en début de matinée, une brève exposition au soleil due à une orientation très légèrement est les réchauffe momentanément. Par contre, les façades et fenêtres exposées au sud, se caractérisent par un échauffement assez important en journée. La nuit les façades restent chaudes assez longtemps et ont une température supérieure à celle de l'air, alors que les vitres se refroidissent assez rapidement et atteignent la même température que l'air. Le stockage de chaleur dans les matériaux telles que le grès et fort probablement le béton, est clairement mis en évidence.

Figure 10 : Températures de surface mesurées sur 2 journées pour deux façades d'un bâtiment en zone urbaine.



Le rayonnement net

- 27 Le rayonnement net a été mesuré sur une station urbaine (DRIRE), sur une station périurbaine à Oberhausbergen et sur une station périurbaine à tendance rurale, (CNRS). En parallèle des gradients de température ont été calculés en °C/heure sur un profil correspondant au site de référence rurale (HEGE) à un site périurbain (HOEN) et à un site urbain (KLEB). En calculant les matrices de corrélation entre les paramètres du rayonnement net et les gradients de refroidissement de nos stations nous obtenons de bonnes corrélations de l'ordre de 0,70. La relation entre les paramètres radiatifs et l'évolution de la température semble donc évidente.
- 28 Nous allons comparer le rayonnement net entre les différents niveaux de mesure. Sur les toits, par ciel clair, le rayonnement net montre des valeurs maximales de 520 W.m^{-2} vers 12 h TU. Ces valeurs sont réduites jusqu'à 250 et 300 W.m^{-2} , par ciel couvert. La nuit, les valeurs sont de l'ordre de -50 W.m^{-2} . Sur les mâts à 10 m par ciel clair, on note des valeurs qui s'échelonnent de l'ordre 480 de 520 W.m^{-2} à midi solaire (figures 11 et 12). De nuit,

l'avenue de la Paix présente des valeurs de l'ordre de -50 W.m^{-2} . Les valeurs sont identiques à 10 m et à 2 m la nuit, avenue de la Paix. Avenue de la Marseillaise et avenue de Gaulle, de nuit, le rayonnement net est de -50 W.m^{-2} à 10m et -25 W.m^{-2} à 2 m. Il est probable qu'à 2 m, l'effet du rayonnement infrarouge émis soit plus important.

Figure 11 : Rayonnement net avenue de Gaulle.

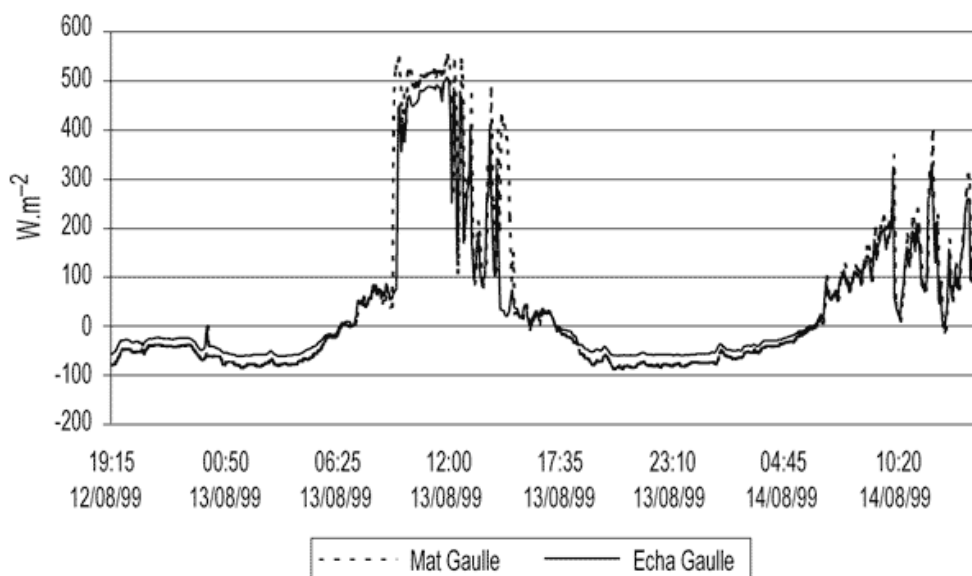
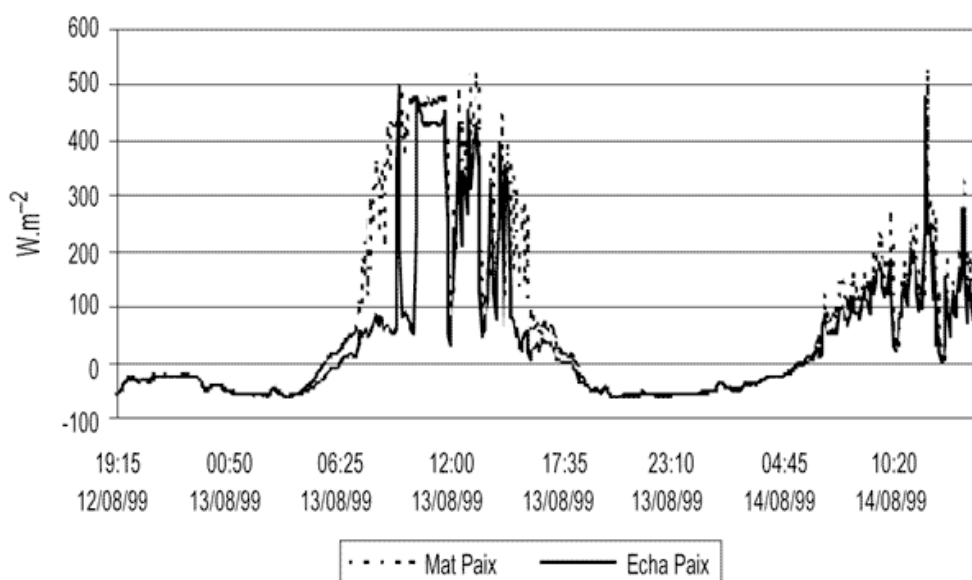


Figure 12 : Rayonnement net avenue de la Paix.



- 29 Dans les rues à 2 m et à 10 m, le rayonnement net est assez identique, ce qui indique une compensation entre le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge.

II. L'îlot de chaleur urbain

- 30 Juxtaposant une multitude d'objets de dimensions, de formes et d'implantations différentes, la ville impose aux éléments du climat de nombreuses modifications, comme

le détournement du vent ou la création de zones d'ombre pour le rayonnement. Les espaces urbains (quartiers pavillonnaires ou habitats collectifs, places, rues, bas et sommets des immeubles) génèrent différents microclimats, caractérisés chacun par des ambiances climatiques particulières (Beltrando et Chémery, 1995). Par temps calme, il fait nettement plus chaud la nuit, en ville qu'en périphérie. Cette différence peut dépasser 10 °C dans certains cas extrêmes, mais une valeur de 2 à 3 °C est considérée comme moyenne à l'échelle d'une année. C'est ce phénomène qui est appelé îlot de chaleur urbain. Le gradient horizontal de température qui se met en place peut avoir des répercussions sur les vents : entre le centre des villes et leur périphérie, il peut se former des brises thermiques semblables à celles observées à l'échelle d'une vallée ou d'un littoral. La nuit, l'air s'écoule de la campagne froide vers la ville, plus chaude, qui génère des pressions un peu plus basses par effet thermique. La vitesse de ces brises peut atteindre 2 à 3 m/s. Par ailleurs, cet effet de chaleur urbain se répercute sur le gradient thermique vertical : la ville est surmontée d'une couche de mélange plus chaude, mais aussi plus riche en polluants divers, qui prend la forme d'un dôme ou d'un panache lorsque le vent la déporte. Cette couche peut être le siège de mouvements convectifs internes, qui brassent l'air et peuvent favoriser des ascendances génératrices de précipitations.

- 31 Pour identifier ces phénomènes à Strasbourg, nous avons dans un premier temps effectué une étude radiative de la zone urbaine. Les aspects thermiques étant le résultat direct des échanges radiatifs et énergétiques, l'étude des données radiatives nous a apporté des informations essentielles pour comprendre l'organisation des champs de température, qui fait l'objet de notre seconde partie. Nous avons étudié de façon précise les données de températures recueillies lors de notre campagne de mesure. Une cartographie des champs thermiques est venue épauler notre réflexion. Pour caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain, nous avons mis en relation les données de surface, avec des profils verticaux de température. Ceci permet de cerner le comportement thermique de la couche limite urbaine. Ce comportement thermique est un facteur important pour la compréhension des phénomènes de pollution atmosphérique urbaine.
- 32 Les conditions synoptiques qui favorisent la constitution de l'îlot de chaleur urbain sont nombreuses. Lee (1992) considère que les principaux facteurs qui favorisent l'îlot de chaleur urbain sont : un ciel peu nuageux, des vents faibles et une forte stabilité atmosphérique. Dans les villes des latitudes moyennes, l'îlot de chaleur urbain peut-être plus important lors des nuits estivales, quand la chaleur emmagasinée par les bâtiments pendant le jour, est dissipée.
- 33 Dans un premier temps, pour initier nos travaux, il convient de caractériser l'occupation du sol autour de nos stations de mesure. Ce paramètre peut en effet s'avérer important pour l'explication de la dynamique spatiale des températures. Dans un second temps notre attention s'est portée sur l'analyse précise des mesures effectuées sur chacune des stations afin de déterminer la station retenue comme référence rurale.

A. L'environnement des stations de mesure

- 34 L'occupation du sol a été déterminée pour un rayon de 500 m autour de la station, par une image LANDSAT TM d'une résolution de 30 m et agrégée en mailles de 100 m de côté, d'où une légère perte de précision. Nous avons retenu 5 classes (Eau, Bâti dense, Bâti lâche,

Industriel, Végétal), pour leur influence sur les mesures de température et l'humidité relative. Les classes ont été définies par deux images prises, l'une en hiver et l'autre au printemps.

- 35 Les zones urbaines sont bien caractérisées au niveau du bâti dense représentant un pourcentage important. Il en est de même pour les zones périurbaines et rurales respectivement bien discernées en bâti lâche et en surfaces végétales. L'occupation des sols de notre étude, a un rôle déterminant dans l'explication de l'îlot de chaleur.

B. La référence rurale

- 36 Pour analyser le comportement thermique de notre zone d'étude, et répondre au mieux à notre problématique, il est important de pouvoir comparer les températures mesurées sur chacune de nos stations, à une température de référence. Cette référence doit être établie sur un site qui présente le moins d'influences extérieures, propres à modifier artificiellement la mesure. La référence rurale doit également être représentative de la région étudiée. La proximité de sources artificielles de chaleur, ou de structures urbaines, qui modifient l'exposition du site par rapport au rayonnement solaire, sont notamment à éviter.

1. Les critères de classification des sites

- 37 Pour définir le, ou les sites, de référence rurale, nous avons retenu 2 critères fondamentaux :
- le premier critère concerne l'environnement des stations de mesure. Nous avons tenu compte à la fois de l'occupation du sol et de la situation géographique du site ;
 - le second critère est basé sur l'étude de l'évolution du profil des températures, pour des journées à ciel clair et des journées à ciel couvert, sur les différents sites retenus lors de l'évaluation par le premier critère.
- 38 Le critère d'environnement de la station permet de faire une première sélection. En analysant l'occupation du sol et la situation géographique du site on peut d'emblée éliminer un certain nombre de sites. Pour cela nous avons dans un premier temps sélectionné les stations dont l'occupation du sol présente au moins 80 % de végétal. La valeur de 80 % nous semble représentant un seuil intéressant pour définir un premier critère de ruralité. Oke (1978) a par ailleurs montré qu'il convient d'aller au-delà de 80 % pour gommer tout effet urbain. Outre le critère d'occupation du sol, nous avons ajouté à notre sélection des sites qui étaient considérés comme périurbains et ruraux, dans le réseau de l'ASPA. Des sites installés spécifiquement pour notre campagne de mesure, dans des zones assez bien végétalisées, mais présentant toutefois moins de 80 % d'occupation du sol en végétal, ont été sélectionnés également.
- 39 Dans un second temps, nous avons analysé avec précision l'environnement des stations. Les stations situées dans des zones assez fortement végétalisées, mais à proximité immédiate de bâtiments ont été rejetées car les bâtiments peuvent dans certaines conditions, créer un apport artificiel de chaleur. Nous avons rejeté également les stations situées au milieu de champs, en bordure directe de l'agglomération strasbourgeoise pouvant être sous l'influence de phénomènes thermiques se produisant dans la couche limite. Au terme de cette première sélection, 6 stations pouvaient répondre au critère de

ruralité. Certains sites de proximité industrielle ou de route à fort trafic ont été éliminés en raison d'un apport de chaleur artificiel.

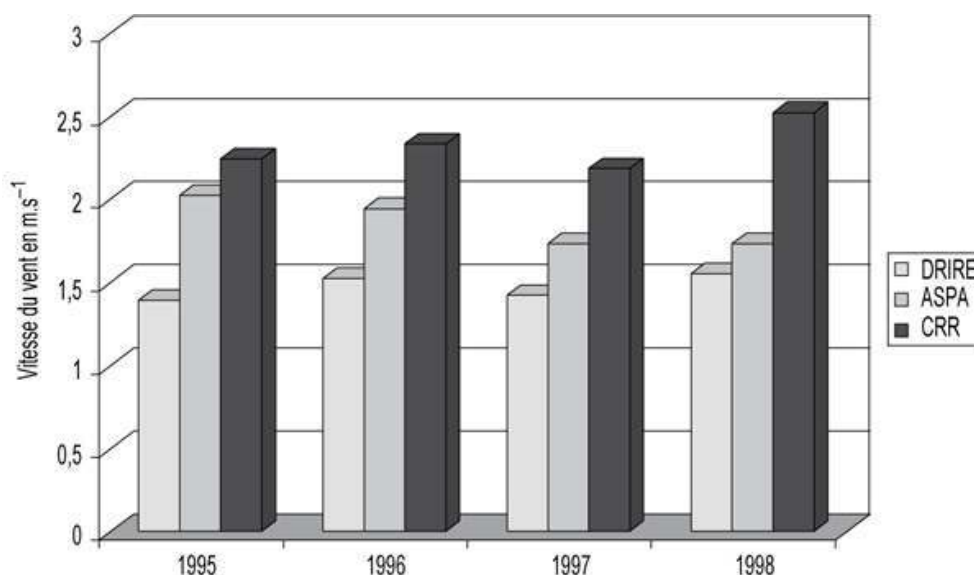
2. Le choix de la référence rurale

- 40 Nos investigations ne permettent pas de définir une référence rurale absolue. L'observation des températures dans le temps présente des variations qui ne sont pas toujours en faveur de la même station. Compte tenu de ces observations et de l'environnement, le site d'Hegeney, (97 % en végétal), situé à 40 km de Strasbourg, a été retenu comme site de référence rurale. Les autres sites présentent tous une, ou plusieurs particularités qui ne répondent pas totalement aux critères de ruralité.

C. Caractérisation de l'effet de chaleur urbain

- 41 La comparaison des sites urbains à des sites périurbains en terme de température, permet de se rendre compte si l'effet de chaleur urbain est déjà observable sur les courtes distances qui séparent le centre urbain des zones périphériques. L'étude des pressions partielles de vapeur est également importante pour caractériser l'îlot de chaleur. Les températures plus élevées des zones urbaines se caractérisent par un déficit d'évaporation important par rapport à la campagne. Ces données seront finalement mises en relation avec les paramètres de direction et de vitesse du vent, qui peuvent modifier l'allure et l'extension de l'îlot de chaleur. Notre zone d'étude se distinguant par des vitesses moyennes annuelles de vent très faibles et des directions proches de l'orientation du fossé rhénan. DRIRE (station urbaine), ASPA (station périurbaine), CRR (station rurale), figure 13.

Figure 13 : Vitesse moyenne annuelle du vent de 1995 à 1998.



- 42 Nous avons également calculé des gradients de refroidissement entre les zones rurales, périurbaines et urbaines et établi des profils en long de température sur des axes nord-sud et ouest-est. Cette démarche permet d'affiner la compréhension des phénomènes dans l'espace par les profils en long et dans le temps par le calcul des gradients.

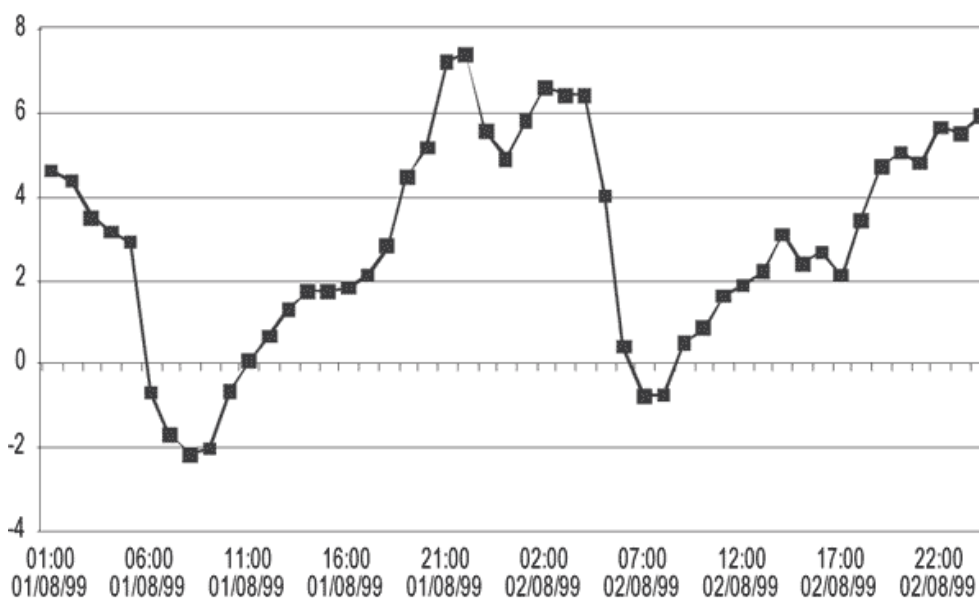
D. Évolution spatiale du champ de température

- 43 La nuit du 1^{er} au 2 août 1999 est celle qui présente les écarts de température les plus importants entre la ville et les zones rurales. La dynamique de l'îlot de chaleur est étudiée pour une journée à ciel clair et pour une journée à ciel couvert.

1. Par ciel clair

- 44 Les journées du 1^{er} et 2 août, très chaudes, sont caractérisées par un ciel bien dégagé. La dynamique spatiale du champ de température a été analysée heure par heure. Vers 11 h TU, le 1^{er} août, le centre urbain commence à se distinguer par un réchauffement progressif par rapport aux zones rurales. Il se poursuit jusqu'à 16 h où la différence de température ville/campagne atteint 2 °C. Vers 17 h, le différentiel de température entre les deux zones s'accroît pour atteindre 7,5 °C à 22 h. À ce moment la température est de 16 °C en zone rurale, sur le site de Hegeney et de 23,5 °C en ville. À 23 h TU, cet écart de température commence à diminuer. La nuit, la différence de température est en moyenne de 6 °C. À 5 h du matin le 2 août, l'écart des températures chute fortement et devient nul à 6 h (figure 14). L'îlot de chaleur urbain est clairement identifiable entre 22 h et 6 h. Vers 7 à 8 h les températures augmentent à nouveau régulièrement sur tous les sites ruraux et urbains et la différence de température est presque nulle. Vers 11 h, le 2 août le réchauffement de la ville par rapport à la campagne se fait à nouveau sentir, l'îlot de chaleur urbain devenant bien marqué en soirée. On observe également sur la figure 13 que vers 7 h du matin, la station Kléber est plus fraîche que la station Hegeney. Il est possible que le flux de chaleur latente soit plus important sur le site Hegeney à ce moment, en raison d'une humidité atmosphérique plus importante.

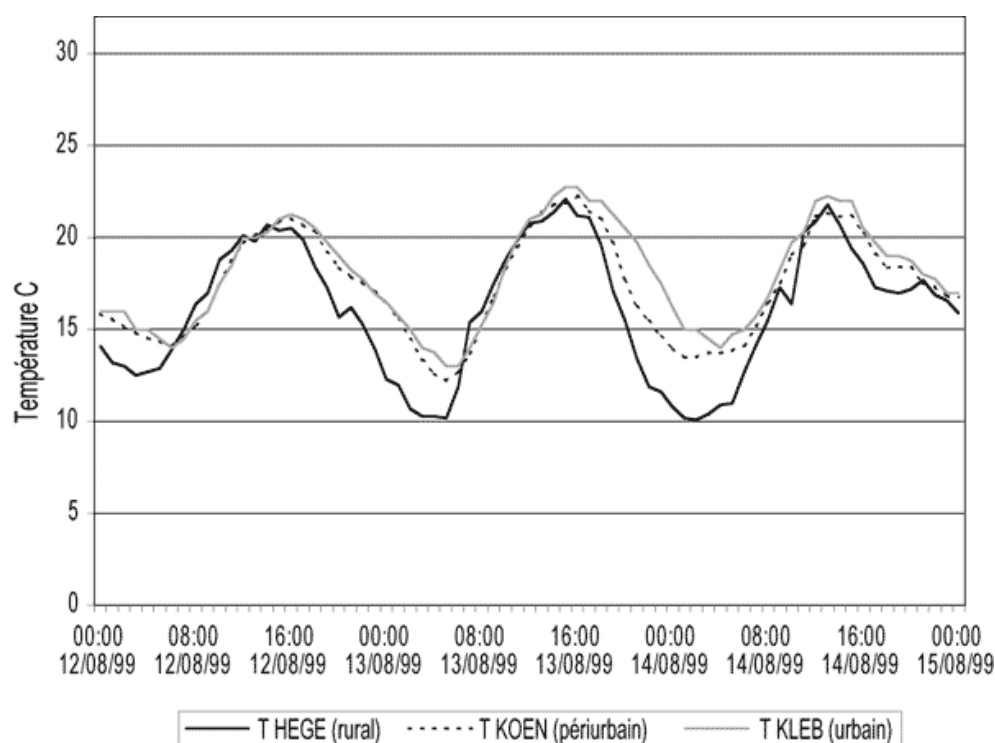
Figure 14 : Différence de température entre le site Kléber et le site Hegeney.



2. La période du 12 au 14 août 1999

- 45 Les différences de température les plus élevées entre les zones rurales et les zones urbaines sont observées la nuit entre 19 h et 5 h, par ciel clair et vent faible (figure 15). Par ciel couvert, avec un vent léger, ces écarts sont réduits. Par ciel clair et vent calme, en première partie de nuit jusqu'à 2 h TU, le refroidissement de l'air en zone urbaine et périurbaine est équivalent. Pendant la nuit du 13 au 14 août, le ciel se couvre peu à peu et les courbes de température en zone urbaine, périurbaine et rurale sont bien séparées. Dans la nuit du 12 au 13 août et du 13 au 14 août la station rurale de Hegeney présente des températures qui sont jusqu'à 5 °C inférieures aux températures observées en zone urbaine et périurbaine. Du fait de la géométrie des structures urbaines et périurbaines le flux radiatif ascendant est bien moins important qu'en zone rurale. D'autre part, la nature des matériaux en ville induit une accumulation importante de chaleur en journée. Cette chaleur stockée dans les bâtiments en journée est relâchée tout au long de la nuit.

Figure 15 : Évolution de la température du 12 au 14 août 1999 (données horaires – heure TU).



E. Dynamique spatiale de l'îlot de chaleur

- 46 Associés aux mesures de vent, les premiers résultats obtenus sont très encourageants et présentent des particularités liées directement à la structure de l'agglomération et probablement à l'effet de brises thermiques. La figure 16 montre des profils de température nord-sud mesurés le 1^{er} août 1999 entre 19 h et 0 h TU. L'îlot de chaleur est décelable entre les zones périurbaines résidentielles situées au nord et au sud de la ville pour ces deux périodes d'observation. Il est également observable que l'intensité de l'îlot de chaleur est plus importante la nuit, par vent synoptique faible de nord-est inférieur à 2

m/s, avec des situations anticycloniques à ciel peu nuageux et forte stabilité atmosphérique, favorables à l'apparition d'un îlot de chaleur urbain (Lee, 1992). On peut constater, comme indiqué précédemment, que le taux de refroidissement varie nettement entre les zones urbaines, périurbaines et rurales. De plus, l'influence de la brise thermique semble être importante pour expliquer le comportement des stations périurbaines comme on le voit pour la station de Geispolsheim. Avant 21 h, cette station a un comportement identique aux stations urbaines par l'effet d'un vent orienté nord-est, qui engendre probablement un panache vers le sud-ouest, sous le vent de la ville. Après 22 h, avec le changement de la direction du vent au nord-ouest, visible sur la figure 17, la station de Geispolsheim a un comportement analogue aux stations rurales. Nous remarquons que le changement de vent concerne uniquement les stations périurbaines et rurales, il y a donc possibilité de mise en place d'une brise rurale.

Figure 16 : Profils de température nord-sud à travers l'agglomération de Strasbourg le 1^{er} août 1999.

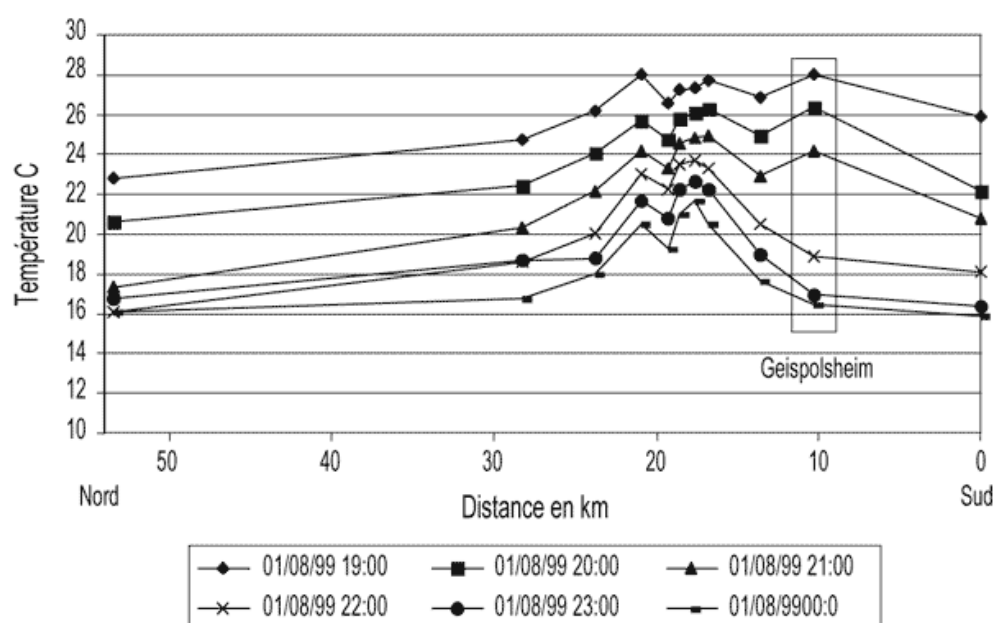
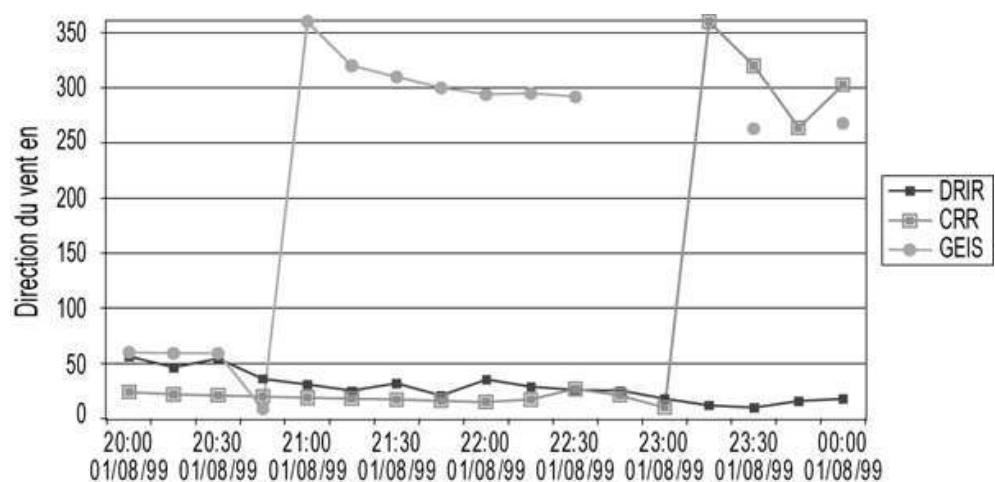
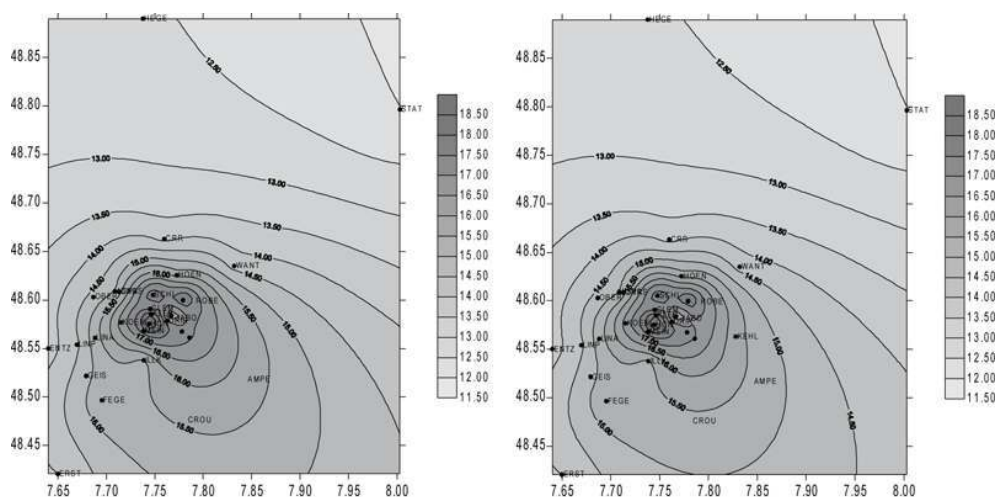


Figure 17 : Direction du vent sur 3 sites entre 20 h et 0 h TU.



- 47 À la lumière de ces premières observations, nous avons étudié de façon plus précise les profils de température pour les axes nord-sud et ouest-est. La station de la place Kléber est réellement le point le plus chaud par temps couvert et par temps clair, mais par temps clair, les stations périurbaines ont des températures pratiquement équivalentes. L'îlot de chaleur a donc une extension spatiale plus importante lors des nuits à ciel clair qui font suite à des journées bien ensoleillées. On notera également que la station du boulevard Clémenceau caractérisée par la présence d'arbres présente un rafraîchissement net. Le refroidissement nocturne est plus intense pour les nuits à ciel clair, lorsque le déficit radiatif est important.
- 48 Les études complémentaires concernent l'élaboration de cartes d'îlot de chaleur urbain (figure 18) à partir du réseau de mesures. L'analyse de ces cartes en corrélation avec les paramètres de ventilation permet de mieux comprendre l'influence de l'occupation du sol et de la géométrie urbaine sur la dynamique spatiale et temporelle de l'îlot. Pour la nuit du 31 juillet 1999 vers 1 h du matin (heure TU), la direction du vent mesurée sur les stations urbaines et rurales présentait des valeurs comprises entre 290 et 5°. Nous étions sous l'influence d'un flux de nord-ouest avec des vitesses faibles de l'ordre de 1,5 m/s. Si l'on observe les cartes de température (figure 18), on constate que le panache de chaleur visualisé très nettement sur la carte est déporté légèrement vers le sud-est directement sous l'influence du vent synoptique. Les 2 cartes sont établies pour la même période, mais sur la deuxième carte nous avons ajouté une station supplémentaire qui est localisée en Allemagne près de la frontière. L'information apportée par cette station supplémentaire laisse penser que l'hypothèse d'une influence directe de la ville n'est pas à écarter. On voit clairement ici, et c'est le cas pour toutes les cartes que nous avons établies, que l'ajout d'une station supplémentaire à l'est n'apporte cependant pas beaucoup d'informations supplémentaires. Cependant, le panache que nous observons sur les cartes pourrait être un artefact de calcul. Il faudrait plus de stations de mesure au sud-est pour confirmer nos hypothèses.

Figure 18 : Champs de température le 31 juillet 1999 entre 1 h et 2 h TU (méthode d'interpolation par krigeage ; avec la station de Kehl à gauche, sans la station de Kehl à droite).



F. Le rôle de l'occupation du sol

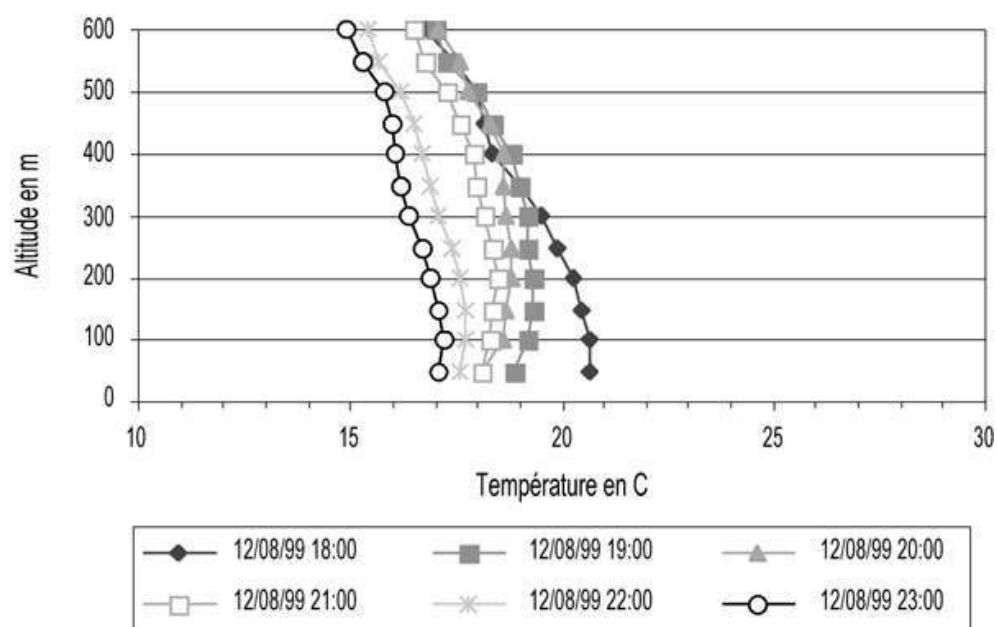
- 49 Parmi les facteurs explicatifs de l'îlot de chaleur, Oke (1978), et d'autres auteurs évoquent le rôle de l'occupation du sol. Dans cette optique nous avons calculé les écarts maximaux de températures entre les stations urbaines et rurales, afin de les comparer aux classes d'occupation définies précédemment. Nous avons également effectué cette comparaison en regroupant les classes d'occupation du sol de typologie très proche en définissant par exemple une classe de bâti total, sans tenir compte de la densité d'habitation. On constate que plus la végétation est prédominante, plus l'écart de température est faible. Il est proche de 7 °C en l'absence de végétation et chute à 3 °C pour des zones où la végétation représente jusqu'à 70 % de l'occupation du sol. Cette relation est l'inverse de ce que l'on peut observer avec des espaces dans lesquels le bâti dense prédomine. Ces résultats confirment ceux des travaux menés notamment par Oke, sur les villes nord-américaines.

G. L'évolution du profil vertical de température les 12 et 13 août 1999

- 50 Duckworth et Sandberg (1954), cités par Oikawa et Meng (1995), ont mesuré des profils verticaux de l'atmosphère urbaine et ont remarqué qu'au centre des villes, la nuit, par ciel clair, le profil thermique est quasi neutre et que la base des inversions nocturnes est souvent située à une altitude correspondant à la hauteur moyenne des bâtiments. La couche limite urbaine semble contrôlée par des turbulences résultant des effets induits par le bâti plutôt que par l'émission de chaleur. D'autre part, la turbulence décroît avec l'altitude. Qu'en est-il à Strasbourg ?
- 51 Nous avons effectué des mesures de profils verticaux de température par un appareil à télédétection micro-ondes, le MTP-5, jusqu'à 600 m au-dessus du sol (Site ASPA). Il est intéressant d'étudier les profils de température lors de périodes à ciel couvert et à ciel clair qui se succèdent. Nous avons retenu les journées du 12 et du 13 août qui sont très représentatives.
- 52 La situation météorologique de la période étudiée a été caractérisée par le passage d'une dorsale anticyclonique mobile, se déplaçant d'ouest en est. Elle a d'abord été caractérisée par un flux de secteur nord, qui s'est affaibli au cours de la nuit du 12 au 13, durant laquelle le ciel est devenu peu nuageux. La cellule anticyclonique, centrée sur la région au cours de la journée du 13, a généré des vents variables et faibles. Puis, dans la soirée et la nuit du 13 au 14, un flux de sud-ouest s'est mis en place en se renforçant progressivement, alors que le ciel se couvrait, à l'approche d'une perturbation océanique.
- 53 Le 12 août, de 0 à 5 h TU, la baisse de température a été assez uniforme au cours de la nuit ; l'absence d'inversion de température reflète la présence d'un couvert nuageux et du vent de nord assez marqué, qui assure un brassage vertical de la basse atmosphère. Le gradient thermique vertical moyen est compris entre -0,1 et -0,3 °C par 100 m. Toutefois, une faible inversion de température se manifeste entre 50 et 100 m. Dès 6 h, après le lever du soleil, le gradient thermique vertical s'accroît brutalement à partir de la surface et atteint -1,2 °C par 100 m vers 11 h. La couche atmosphérique, particulièrement instable en fin de matinée et au cours de l'après-midi, est favorable aux échanges aérologiques verticaux et à une uniformisation des températures de l'air près de la surface. Le gradient devient nul au-dessous de 100 m. Une légère inversion de

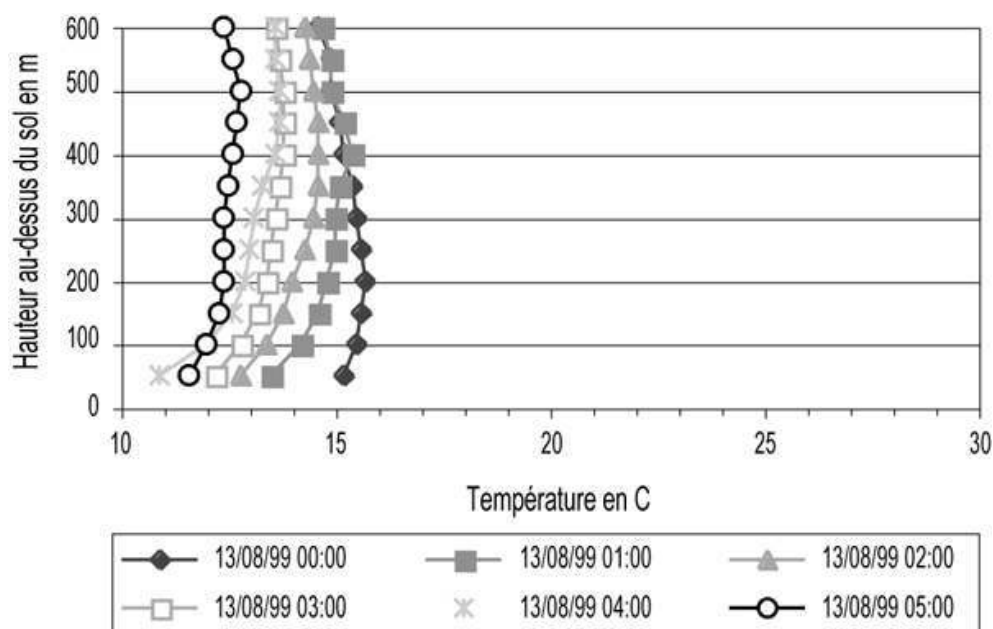
température tend à se mettre en place vers 20 h, malgré un ciel encore très nuageux (figure 19).

Figure 19 : Profils verticaux de température le 12 août entre 18 h et 23 h.



- 54 Le 13 août, la figure 20 montre que l'inversion de température s'accroît nettement après 0 h ; en effet, un déficit radiatif plus grand apparaît à la surface du sol, en liaison avec la disparition assez soudaine du voile de strato-cumulus, qui persistait en début de nuit. Le gradient thermique vertical moyen devient positif entre 0 et 600 m et atteint près de 0,5 °C par 100 m. En réalité, la présence de l'inversion ne s'étend pas au-delà d'une hauteur de 300 m (figure 20). Cette situation traduit une masse d'air très stable. La disparition de l'inversion est brutale entre 5 et 6 h, comme le jour précédent.

Figure 20 : Profils verticaux de température le 13 août entre 0 h et 5 h.



Conclusion

55 Les mesures radiatives menées à Strasbourg concernaient une gamme de longueurs d'ondes assez étendue, sur des sites représentatifs du comportement radiatif de la ville. Le rayonnement global mesuré en zone urbaine, est apparu seulement de 8 % plus faible que celui mesuré en zone rurale. Les mesures radiatives effectuées sur les toits et dans les rues à différents niveaux, ont permis de mettre en lumière les effets de la géométrie urbaine sur le rayonnement. Le rayonnement incident en courtes longueurs d'ondes montre des valeurs qui s'élèvent à 800 W.m^{-2} . Dans les rues, le rayonnement réfléchi montre des valeurs croissantes, au fur et à mesure que l'on s'approche du sol. Ces observations nous permettent de mettre clairement en lumière les effets de canyons urbains sur l'albedo. L'effet de masque, dû aux bâtiments, est parfaitement identifiable. On constate que plus le rapport H/W est faible, plus l'atténuation du rayonnement incident est forte. Nous avons également observé que l'albedo diminue avec la hauteur, d'autant plus vite que le rapport H/W est fort. En ce qui concerne le rayonnement en grandes longueurs d'ondes, nous avons pu observer que de nuit, le rayonnement infrarouge descendant est plus fort à 10 m dans les rues, que sur les toits. L'énergie thermique absorbée dans les bâtiments en journée, est émise en grandes longueurs d'ondes la nuit et permet d'expliquer une partie de la dynamique spatio-temporelle des températures de l'air et du gradient de refroidissement. Les mesures radiatives nous ont conduit à l'étude précise des températures. À partir de la référence rurale, nous avons observé que par ciel clair, les zones urbaines sont jusqu'à $7,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ plus chaudes que les zones rurales environnantes, en début de nuit. L'îlot de chaleur urbain a été bien mis en évidence et présente d'assez bonnes relations avec la direction et la vitesse du vent. Par temps clair le refroidissement nocturne atteint $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ par heure en zone rurale et $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ par heure, en zone urbaine. En corrélation avec l'occupation du sol, nous avons constaté

que plus la végétation est prédominante, plus l'écart de température est faible. Outre les mesures de surface, nous avons également bénéficié de mesures verticales qui montrent que la chaleur stockée dans les bâtiments atténue le refroidissement nocturne de l'air et que l'atmosphère dans l'agglomération est moins stable que dans les espaces ruraux environnants. Enfin, nous avons pu constater que des zones vertes telles que les parcs urbains, avaient une influence certaine sur le climat à l'échelle urbaine.

BIBLIOGRAPHIE

- BELTRANDO G., CHÉMERY (1995). — *Dictionnaire du climat*, Paris, Larousse, 344 p.
- FALLOT J.-M., BUMAN A.-M., ROTEN M., RUFFIEUX D. (1984). — « Mesures de l'îlot de chaleur urbain dans le cadre d'une petite ville à topographie tourmentée : le cas de Fribourg (Suisse) », *Fonds national suisse de la recherche scientifique*, subside n° 2.094 - 0.83, Université de Fribourg, Institut de Géographie, pp. 20-29.
- GUSTAVSSON T. (1995). — « A study of air and road-surface temperature variations during clear windy nights », *International Journal of Climatology*, Vol. 15, pp. 919-932.
- KIM H.H. (1991). — « Urban heat island », *Proceedings of the 5th International Colloquium, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, pp. 521-525.
- LEE D.O. (1992). — « Urban warming ? - An analysis of recent trends in London's heat island », *Weather*, Vol. 47, n° 2, pp. 50-56.
- LEE D.O. (1984). — « Urban climates », *Progress in Physical Geography*, Volume 8, n° 1, mars, pp. 1-29.
- MESTAYER P.-G., ANQUETIN S. (1995). — « Climatology of cities », *Third International Conference on Air pollution, Air pollution 95*, Actes du colloque, pp. 1-35.
- MESTAYER P.-G. (1996). — « Développement du modèle communautaire de dynamique, physique et photochimie de l'atmosphère urbaine, sub-meso », *Journées du programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS, Actes Poster Thème 4*, pp. 267-272.
- MESTAYER P.-G., SINI J.-F., JOBERT M. (s.d.). — « Simulation of the wall temperature influence on flows and dispersion within street canyons ». In : Power H., Moussiopoulos N., Brebia C.A., Éd., *Air Pollution Theory and Simulation*, Air Pollution n° III, Vol. 1, pp. 109-115.
- MILLER-CHAGAS P., PAUL P. (1980). — *Configurations urbaines : apports énergétiques et microclimats - Étude des espaces extérieurs de trois ensembles à Strasbourg*, Contrat de Recherche PLAN CONSTRUCTION, ARIAS n° 78 61 015, ARIAS, Palais du Rhin, Strasbourg, 182 p.
- MORENO-GARCIA M.C. (1994). — « Intensity and form of the urban heat island in Barcelona », *International Journal of Climatology*, Vol. 14, pp. 705-710.
- OIKAWA S., MENG Y. (1995). — « Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer », *Boundary-Layer Meteorology*, pp. 289-311.
- OKA T.R., EAST C. (1971). — « The urban boundary layer in Montreal », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 1, pp. 411-437.

- OKE T.R., MC CAUGHEY J.H. (1983). — « Suburban-rural energy balance comparisons for Vancouver, B.C. : An extreme case », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 26, pp. 337-354.
- OKE T.R. (1978). — *Boundary layer climates*, Londres, Editions Methuen & Co Ltd, 372 p.
- OKE T.R. (1981). — « Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations », *Journal of Climatology*, Vol. 1, pp. 237-254.
- OKE T.R. (1984). — *Methods in urban climatology*, Department of Geography University of British Columbia, Vancouver. Official Representative, W.M.O., Geneva, Switzerland, pp. 19-29.
- SCHMID H.P., CLEUGH H.A., GRIMMOND C.S.B., OKE T.R. (1991). — « Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 54, pp. 249-276.
- TAPPER N.J. (1990). — « Urban influences on boundary layer temperature and humidity : Results from Chistchurch, New Zealand », *Atmospheric Environment*, Vol. 24B, n° 1, pp. 19-27.
- VOOGT J.A., OKE T.R. (1997). — « Complete urban surface temperatures », *Journal of Applied Meteorology*, n° 36, pp. 1117-1132.
- ZIMMERMANN H. (1987). — « Die Stadt in ihrer Wirkung als Klimafaktor », *Promet*, n° 3-4, pp. 17-24.

RÉSUMÉS

Les études sur le climat urbain des grandes agglomérations suscitent un intérêt croissant, pour des applications très variées, notamment l'étude des épisodes de pollution. Les phénomènes d'îlot de chaleur urbain et les processus radiatifs, sur l'agglomération de Strasbourg, ont été étudiés à partir d'un réseau de 26 stations de mesure. L'analyse des paramètres et processus climatiques à l'échelle urbaine devrait permettre l'amélioration de la fiabilité d'un modèle de prévision de la pollution atmosphérique. Ces travaux se sont déroulés dans le cadre du programme de recherche PRIMEQUAL.

Urban climate studies in large towns raise growing interest in widely varying applications, notably research on air pollution. Within this scope and using 26 measurement stations, we have studied the urban heat island and radiative phenomenon in Strasbourg and its suburbs. The study of climatic processes on an urban scale should allow for improvements in the reliability of atmospheric pollution forecast models. This work was organised in the PRIMEQUAL research project.

Forschungen über das Klima von grossen Ortschaften rufen ein zunehmendes Interesse hervor, für verschiedene Zwecke, besonders für die Studien über Luftverschmutzung. In diesem Rahmen und mit den Daten von 26 Messungsanlagen, haben wir über die städtische Hitzinsel und die Strahlungsprozesse in der Umgebung von Strassburg gearbeitet. Die Forschung über klimatische Vorgänge, in verschiedenen Massstäben in der Stadt, müsste eine Verbesserung der Zuverlässigkeit von der Luftverschmutzungsvorhersage vorrufen. Diese Studien wurden im Rahmen des Program PRIMEQUAL durchgeführt.

INDEX

Schlüsselwörter : Hitzinsel, Luftverschmutzung, Messungsanlage, Strahlungsprozess, Umgebung von Strassburg

Mots-clés : agglomération de Strasbourg, îlot de chaleur urbain, phénomène radiatif, pollution atmosphérique, station de mesure

Keywords : atmospheric pollution, measurement station, radiative phenomenon, Strasbourg, urban heat island

AUTEUR

LAURENT FISCHER

Faculté de Géographie & d'Aménagement, Université Louis Pasteur, 3 rue de l'Argonne, F-67000 Strasbourg, France